

Particularités du flux de chaleur critique à des pressions faibles

Andrei Olekhnovitch

École Polytechnique de Montréal
Institut de génie nucléaire
C.P. 6079, succ. Centre-ville, Montréal (Québec) Canada H3C 3A7
Andrei.Olekhnovitch@polymtl.ca

Résumé :

L'objectif de cette présentation est l'analyse de trois différents phénomènes qui accompagnent parfois le flux de chaleur critique (FCC) dans les conditions d'un écoulement annulaire-dispersé : la rotation du ruisseau de liquide sur la paroi lors du FCC, la chute de température de la paroi avant le FCC et l'apparition du FCC en amont de la sortie du canal chauffé uniformément.

Abstract :

This work is concerned with the analysis of three different phenomena which sometimes accompany the critical heat flux (CHF) under dispersed-annular flow conditions: the rotation of the rivulet during the CHF occurrence, the wall temperature drop before the CHF and the upstream CHF in a uniformly heated channel.

Mots-clefs :

transfert de chaleur ; ébullition ; flux de chaleur critique

1 Introduction

L'ébullition et surtout l'ébullition en convection forcée favorise le transfert de chaleur d'une manière beaucoup plus intense que tous les autres processus existants. Ceci est relié à une augmentation de la turbulence de la phase liquide dans l'écoulement diphasique due à l'apparition des bulles de vapeur, ainsi qu'à la chaleur latente de vaporisation transmise directement à la vapeur. Il y a pourtant une limitation physique stricte qui complique l'utilisation des écoulements diphasiques dans le cas des systèmes énergétiques à haute puissance : le flux de chaleur critique (FCC). Ce terme indique, d'une façon générale, la situation dans laquelle la surface chauffée s'assèche et le transfert de chaleur se détériore soudainement. Dans les systèmes thermiques ordinaires avec un flux de chaleur constant, cette détérioration entraîne une augmentation considérable de la température de l'élément chauffant et peut amener à sa destruction. Ainsi, le FCC représente l'un des plus importants paramètres de la thermohydraulique diphasique dont la prédiction précise est essentielle afin d'assurer le fonctionnement sécuritaire et efficace des installations.

Le FCC est gouverné par de multiples processus de transfert de masse et de chaleur qui ont lieu dans les écoulements diphasiques bouillants. C'est seulement après avoir adéquatement décrit ces processus qu'on peut développer un modèle physique fiable pour la prédiction du FCC. À l'heure actuelle, bien que de nombreux travaux théoriques et expérimentaux aient été effectués pour comprendre les mécanismes du FCC, le niveau de compréhension de la nature du phénomène du FCC laisse encore à désirer. La complexité inhérente aux écoulements diphasiques bouillants, explique l'utilisation de plusieurs hypothèses dont la validité est souvent

questionnable et/ou difficile à vérifier. De ce point de vue, l'analyse détaillée du comportement de la température de la paroi de canal à proximité du FCC peut parfois être très utile pour la clarification des mécanismes qui sont mis en jeu.

2 Rotation d'un ruisseau sur la paroi d'un canal

La majorité des études du FCC a été effectuée pour des tubes ronds, verticaux, chauffés par un courant électrique (effet Joule). Pour des paramètres d'écoulement fixes, l'augmentation, lente et/ou par paliers, de la puissance appliquée cause, à un certain moment, soit un accroissement rapide de la température de paroi, soit des fluctuations importantes de cette température. Cette technique a également été utilisée par Olekhovitch *et al.* (1997) afin d'effectuer une recherche sur le FCC pour les écoulements eau-vapeur verticaux à des pressions faibles et moyennes (de 5 à 40 bars). Les sections d'essais ont été fabriquées à partir des tubes cylindriques en Inconel 600 de diamètre interne de 8 mm, étirés à froid en utilisant les technologies de pointe. Le schéma principal d'une section d'essais typique est représenté à la Fig. 1(a).

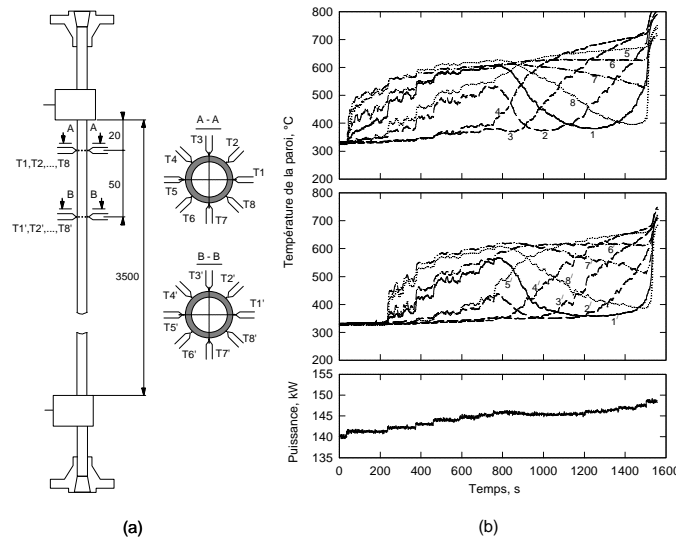


FIG. 1 – La section d'essais (a) et la variation dans le temps de la puissance appliquée et de la température de paroi lors du FCC pour de différentes positions axiales de la zone chauffée (b)
 $(P_{sor} = 30 \text{ bars} ; G = 5000 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} ; x_{sor} = 0.306)$.

Au cours de cette étude, pour des sections chauffées longues et pour des vitesses massiques élevées, un phénomène non décrit auparavant a été observé. Dans ces cas, le comportement de la température de paroi indiquait l'existence d'un ruisseau de liquide sur la paroi qui tournait très lentement le long de la circonférence du tube [Fig. 1(b)]. Cette rotation pouvait se produire dans des directions différentes ou même plus, le ruisseau effectuait des mouvements oscillants complexes. Alors, le phénomène observé ne peut pas être expliqué seulement par des forces ordinaires qui agissent sur l'écoulement. Il existe donc l'une ou bien plusieurs raisons qui pourraient causer la rotation du ruisseau. Parmi ces raisons, c'est la force réactive qui semble être la plus convenable. Cette force apparaît toujours lors de l'évaporation, car la différence entre les densités de vapeur et d'eau occasionne le changement de la vitesse et de la quantité de mouvement à l'interface eau-vapeur et l'apparition d'une force normale à cette interface. D'autre part, il est connu que les tubes étirés à froid se caractérisent par une variation en spirale de l'épaisseur de tube. D'après les standards industriels, l'excentricité d'un tube ne doit pas être

plus élevée que 10% de l'épaisseur. Néanmoins, en dépit de sa valeur faible, cette excentricité peut entraîner une non uniformité importante de la distribution angulaire du flux de chaleur dans le cas du chauffage par l'effet Joule en raison d'une différence significative entre les résistances électriques locales. La Fig. 2(a) illustre la distribution du flux de chaleur pour un tube d'une épaisseur de 2 mm qui a été utilisé pour les expériences analysées.

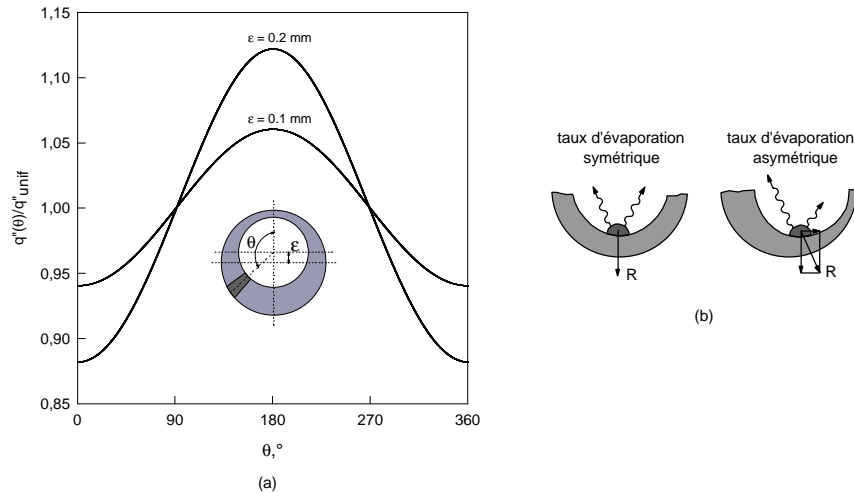


FIG. 2 – La distribution circonférentielle du flux de chaleur dans un tube excentrique (a) et la force réactive (b).

Dans un cas idéal présenté schématiquement à la Fig. 2(b) (le tube est parfaitement concentrique et le ruisseau est absolument symétrique), la composante tangentielle de la résultante de cette force est nulle. Dans le cas réel, le flux de chaleur en dessous du ruisseau n'est pas uniforme. Alors, la distribution superficielle de la force réactive ne sera également pas uniforme et la composante tangentielle de sa résultante ne sera pas non plus nulle. Par conséquent, le ruisseau peut être mis en mouvement. La direction de son déplacement dépend de sa position initiale, de sa longueur et de la position de la génératrice du tube où la valeur moyenne du flux de chaleur est minimale. De plus, en raison de la nature aléatoire des écoulements diphasiques, la longueur du ruisseau peut être fluctuante, ainsi le ruisseau peut bouger dans des directions différentes.

3 Chute de la température de la paroi avant le flux de chaleur critique

Considérons un autre phénomène qui accompagne fréquemment le FCC et qui a été mentionné à plusieurs reprises dans la littérature scientifique sur le FCC [Beattie (1986)], mais qui n'a guère été examiné et traité en détail. Il s'agit d'une diminution rapide de la température de paroi de quelques degrés qui se produit peu avant que l'assèchement ait lieu. Ce phénomène surprenant (une diminution de température précède son augmentation ou, autrement dit, une amélioration rapide du transfert de chaleur précède sa détérioration brusque) a également été observé à peu près pour un tiers des expériences effectuées par Olekhovitch *et al.* (1997).

La Fig. 3(a) montre qu'à une puissance entre 2 et 6 kW inférieure à la puissance critique, la température de paroi diminue rapidement et, à partir de ce moment, la surchauffe commence à diminuer. Cette diminution de la surchauffe continue jusqu'au moment où les conditions du FCC sont atteintes. De plus, l'examen de la Fig. 3(a) permet de conclure que, même dans le cas, où aucune chute rapide de la température de paroi ne soit observée, la surchauffe de paroi à proximité du FCC diminue en fonction de la puissance appliquée.

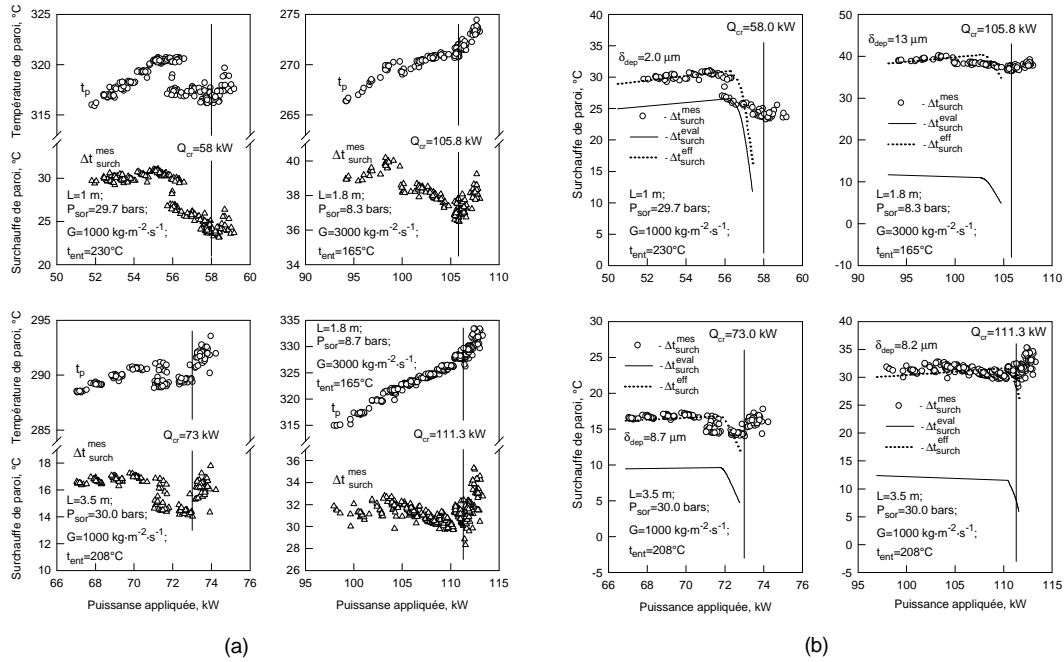


FIG. 3 – La température et la surchauffe de paroi en fonction de la puissance appliquée (a) et la surchauffe de paroi mesurée et calculée en fonction de la puissance appliquée (b).

Il existe quelques explications de ce phénomène. D'après Groeneveld (1975), la chute de la température résulte d'une décélération du film de liquide qui a lieu en amont de la zone d'assèchement. Cette décélération cause une augmentation de la surchauffe de paroi à cet endroit et, par conséquent, le commencement de l'ébullition dans le film de liquide. Une fois débuté, l'ébullition provoque une augmentation rapide du coefficient de transfert de chaleur et, ainsi, une diminution de la température de paroi. Cependant, il n'est pas clair pourquoi un film de liquide mince ne se détruit pas toute de suite après le début de cette ébullition.

Une analyse, basée sur un modèle simplifié du transfert de chaleur dans le film de liquide, a permis de conclure qu'il est plus probable que cette chute de la température est causée par l'amincissement du film jusqu'à une épaisseur si faible que la conduction thermique devient prédominante. L'examen des graphiques présentés à la Fig. 3(b) démontre que les surchauffes calculées en utilisant le modèle développé, commencent à diminuer rapidement presque aux mêmes puissances pour lesquelles les chutes de température avant le FCC ont été observées.

4 FCC en amont de la sortie d'un canal chauffé uniformément

Dans la majorité des cas, le FCC a lieu à la sortie du canal chauffé où la concentration de vapeur est toujours la plus élevée. Cependant, dans les conditions des vitesses massiques très élevées et des sousrefroidissements faibles, le FCC ne se produit pas à la sortie, mais plutôt à des endroits différents en amont. En plus, les résultats obtenus par Waters *et al.* (1997) montrent que l'assèchement de la paroi en amont de la sortie change radicalement la liaison entre le FCC et le sous-refroidissement ou le titre thermodynamique : les valeurs de FCC commencent à augmenter avec la diminution du sous-refroidissement et avec l'augmentation du titre.

Habituellement, on suppose que le FCC en amont de la sortie du canal chauffé uniformément est causé par le surpeuplement des bulles de vapeur sur la surface chauffée lors de la formation d'une structure spécifique écumeuse avec le taux de vide très élevé près de la paroi.

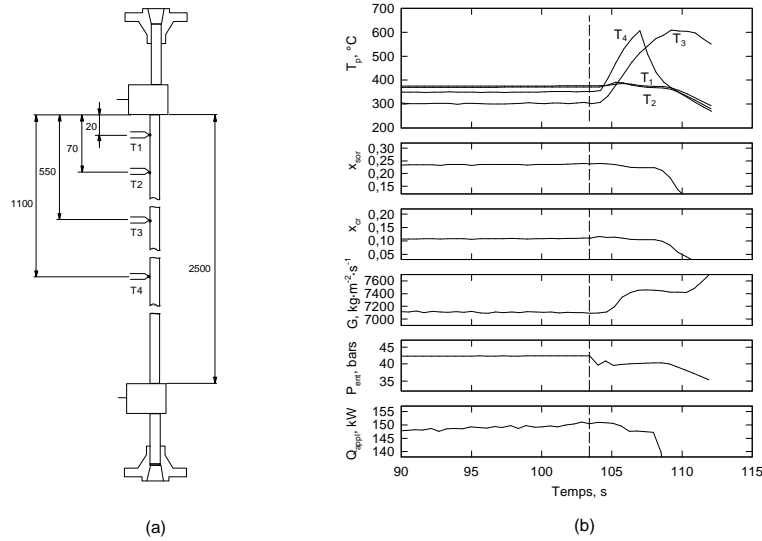


FIG. 4 – La section d’essais (a) et la variation dans le temps de principaux paramètres d’écoulement lors du FCC en amont de la sortie du canal chauffé (b).

Cependant, il est peu probable que cette raison soit unique et, en plus, prédominante. La Fig. 1 montre la disposition des thermocouples le long de la section d’essais et le comportement dans le temps de la température de la paroi et des paramètres principaux d’écoulement observé au cours de l’étude effectuée par Olekhnovitch *et al.* (1997). On peut voir que le titre thermodynamique à l’endroit, où l’assèchement initial a lieu, est égale à 0.11. Cette valeur est beaucoup plus élevée que celle du titre correspondant au début de l’écoulement annulaire-dispersé. Alors, l’assèchement observé se produit dans les conditions d’un écoulement annulaire-dispersé bien développé où l’apparition d’une structure écumeuse est impossible.

Considérons le développement de l’écoulement bouillant le long du canal chauffé [Fig. 5 (a)]. Au fur et à mesure que le flux de chaleur croît, la longueur de la partie du canal occupée par l’écoulement diphasique augmente. Pour un débit massique et une pression donnés, la longueur de transition de l’écoulement par bulles à l’écoulement annulaire-dispersé L_{tr} est inversement proportionnelle au flux de chaleur. Le FCC en amont est toujours observé à des vitesses massiques et, en conséquence, à des flux de chaleur très élevés. Dans ce cas, la longueur de transition disponible peut être très courte. Il est donc probable que, dans certaines conditions, il existe la transition directe de l’écoulement par bulles à l’écoulement annulaire-dispersé. D’autre part, le FCC en amont est observé à des sous-refroidissements à l’entrée très faibles. Alors, à des flux de chaleur élevés, l’ébullition franche commence directement à l’entrée du canal chauffé. Dans ces circonstances, le profil de la vitesse de liquide subit une déformation importante : le liquide s’accélère fortement le long de l’axe du canal. Si la longueur L_{tr} est suffisamment courte, une fraction importante du liquide peut traverser cette zone de l’écoulement par bulles et former une espèce de jet de gouttelettes dans la partie centrale du noyau de vapeur au début de l’écoulement annulaire-dispersé. La quantité de mouvement de ces gouttelettes peut être considérablement plus élevée que dans le cas de la formation normale de l’écoulement annulaire-dispersé, tandis que le spectre de leurs trajectoires initiales doit être plus étroit : la plupart des gouttelettes sont projetées le long de l’axe [Fig. 5 (b)]. Si ces gouttelettes atteignent la surface du film de liquide, ceci se produit, peu importe le mécanisme de l’interaction entre le noyau de vapeur et les gouttelettes, au-delà d’une certaine distance de l’endroit où l’écoulement annulaire-dispersé débute, mais augmente considérablement en aval, le tarissement du film peut se produire en amont de la sortie du canal chauffé à l’endroit où les taux de précipitation et

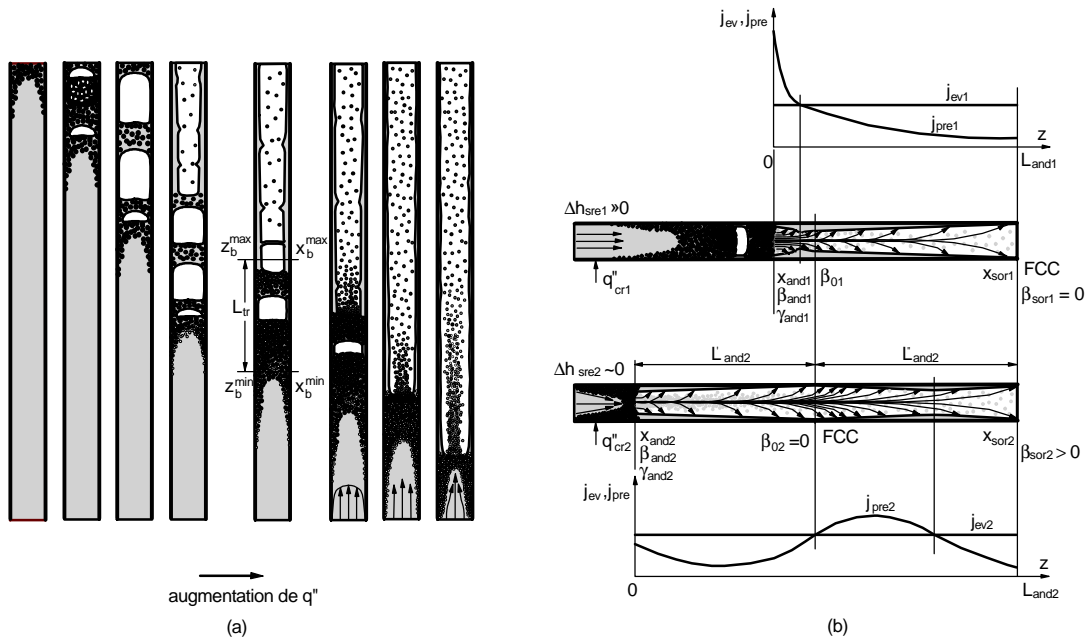


FIG. 5 – Le développement de l'écoulement bouillant (a) et les distributions des taux de précipitation de gouttelettes et d'évaporation à des conditions différentes à l'entrée du canal (b).

d'évaporation sont égaux. On peut montrer que, dans ces conditions, la valeur du FCC et, par conséquent du titre thermodynamique à la sortie, sera plus élevée que pour le cas du FCC qui se produit à la sortie du canal chauffé.

5 Conclusions

L'analyse phénoménologique de trois différents phénomènes qui accompagnent parfois le flux de chaleur critique (FCC) dans les conditions d'un écoulement annulaire-dispersé : la rotation du ruisseau de liquide sur la paroi lors du FCC, la chute de température de la paroi avant le FCC et l'apparition du FCC en amont de la sortie du canal chauffé uniformément, a été effectuée. Les mécanismes physiques responsables de leur apparition ont été examinés.

Références

- Olekhnovitch, A., Teyssedou, A., Tapucu, A., Champagne, P., Groeneveld, D.C. 1999 Critical heat flux in a vertical tube at low and medium pressures. Part I. Experimental results. *Nucl. Eng. Des.* **193**, 73-89.
- Beattie, D.R.H., Lawther, K.R. 1986 An examination of the wall temperature drop phenomenon during approach to flow boiling crisis, Heat transfer 1986, Eighth international heat transfer conference, San Francisco, 1986, Vol. 5, pp. 2215-2219.
- Groeneveld D.C. 1975 Variation in heat transfer parameters near the dryout location, Fifth Canadian congress of applied mechanics, Fredericton, Canada, 1975, pp. 577-578.
- Waters, E.D., Anderson, J.K., Throne, W.L., Batch, J.M. 1972 Experimental observation of upstream boiling burnout. *Chem. Engng. Prog. Symp. Ser.* **61**, 230-237.